

Approved For Release STAT  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec

Approved For Release  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130



Вторая Международная конференция  
Организации Объединенных Наций  
по применению атомной энергии  
в мирных целях

A/CONF/15/P/2475  
USSR  
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

## СКОРОСТНОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ В ТРУБЕ

М.Н.ИВАНОВСКИЙ, В.И.СУББОТИН, Н.А.УШАКОВ

Проблема мирного использования атомной энергии выдвигает в число важнейших задач исследование теплосъема различными теплоносителями, в частности жидкими металлами. Широкое распространение в исследованиях теплоотдачи получил метод, основанный на измерении в стационарном режиме температуры теплоносителя и поверхности теплообмена. В некоторых случаях измерение температуры поверхности теплообмена представляется затруднительным. Нестационарные методы определения коэффициентов теплоотдачи позволяют избежать трудности, связанные с измерением температуры поверхности теплообмена, существенно сокращают время проведения опытов и не требуют сложного экспериментального оборудования.

Скоростной нестационарный метод определения коэффициента теплоотдачи, основанный на измерении скорости охлаждения тела, был предложен в 1927г. М.Б.Кирпичевым и Г.М.Кондратьевым. Метод получил дальнейшее развитие в трудах Г.М.Кондратьева /Л-1/.

В 1952 г. М.А.Михеевым и К.Д.Воскресенским разработан и экспериментально проверен нестационарный метод определения коэффициента теплоотдачи при течении жидкости в трубе /Л-2/.

В этих методах скорость охлаждения тела измеряется в стадии регулярного режима. Основным условием существования регулярного режима является постоянство температуры охлаждающей среды.

25 YEAR RE-REVIEW

Вышеуказанные нестационарные методы неприменимы для исследования теплоотдачи к жидким металлам, т.к. жидкие металлы, вследствие их малой теплоемкости, заметно изменяют свою температуру за счет охлаждения тела. Предлагаемый авторами скоростной нестационарный метод измерения коэффициента теплоотдачи в трубе основан на анализе изменения во времени температуры жидкости и учитывает существенные особенности жидких металлов.

### Теоретические основы метода

Имеется круглая прямая однородная труба. В трубе протекает несжимаемая жидкость. Длина трубы такова, что влиянием участков тепловой и гидродинамической стабилизации на средний коэффициент теплоотдачи можно пренебречь. Тепловые потери отсутствуют. Физические параметры системы не зависят от температуры. Труба и находящаяся в ней жидкость нагреты до температуры  $t_0$  и с начального момента времени труба охлаждается жидкостью, протекающей с постоянной скоростью и с постоянной температурой на входе.

Процесс охлаждения трубы описывается системой дифференциальных уравнений энергии для трубы и движущейся жидкости и соответствующими краевыми условиями.

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\left. \frac{1}{Bi} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} + \theta \Big|_{R=1} = 0 ;$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=R_1} = 0 ; \quad \theta \Big|_{x=0} = 0 ;$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{X_0} \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\omega}{X_0} \theta \Big|_{R=1} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$U \Big|_{Y=0} = 0 ; \quad U \Big|_{x=0} = 1.$$

При этом приняты следующие обозначения:

$$T = \frac{t - u_0}{t_0 - u_0} ; \quad U = \frac{u - u_0}{t_0 - u_0} ; \quad \theta = T - U ;$$

$$R = \frac{r}{r_0} ; \quad R_1 = \frac{r_1}{r_0} ; \quad Y = \frac{z}{l} ;$$

$$X = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2} ; \quad X_0 = \frac{a \cdot \tau_0}{r_0^2} ; \quad \dot{W} = \frac{\alpha \cdot S}{G \cdot c} ;$$

- $z$  - текущая координата вдоль оси трубы,
- $l$  - длина трубы,
- $r$  - текущий радиус,
- $r_0$  - внутренний радиус трубы,
- $r_1$  - наружный радиус трубы,
- $t$  - локальная температура трубы,
- $t_0$  - начальная температура системы,
- $u$  - средняя по теплосодержанию температура жидкости в данном сечении,
- $u_0$  - температура жидкости на входе в трубу,
- $\tau$  - время,
- $\lambda$  - коэффициент теплопроводности трубы,
- $a$  - коэффициент температуропроводности трубы,
- $c$  - удельная теплоемкость жидкости,
- $\bar{W}$  - средняя скорость жидкости,
- $S$  - поверхность теплообмена,
- $G$  - весовой расход жидкости,
- $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,
- $\tau_0 = \frac{l}{\bar{W}}$  - среднее время пребывания в трубе частицы жидкости,
- $X$  - критерий Фурье,
- $Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda}$  - критерий Био.

Уравнения /1/ и /2/ записаны для случая, когда можно пренебречь осевыми перетечками тепла по сравнению с радиальными. Для жидких металлов, имеющих высокую теплопроводность, осевыми перетечками тепла можно пренебречь при значениях критерия Нексе больше 100 /Л-3/.

Уравнение /2/ получено интегрированием по радиусу осредненного по пульсациям уравнения энергии движущейся жидкости и учитывает теплопроводность жидкости и изменение теплопроводности по радиусу.

Для случая, когда температура жидкости постоянна, решение имеет вид:

$$\theta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H(\mu_n \cdot R) \cdot e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}} \dots \dots \dots (3)$$

$$H(\mu_n \cdot R) = [J_0(\mu_n \cdot R) \cdot Y_1(\mu_n \cdot R_1) - Y_0(\mu_n \cdot R) \cdot J_1(\mu_n \cdot R_1)] \dots \dots \dots (4)$$

$$A_n \cdot H(\mu_n) = \frac{2 \cdot Bi}{\left[ \frac{2}{\pi \cdot H(\mu_n)} \right]^2 - [Bi^2 + \mu_n^2]} \dots \dots \dots (5)$$

$\mu_n$  - корни следующего характеристического уравнения:

$$Bi = -\mu_n \cdot \frac{J_1(\mu_n) - \frac{J_1(\mu_n \cdot R_1)}{Y_1(\mu_n \cdot R_1)} \cdot Y_1(\mu_n)}{J_0(\mu_n) - \frac{J_1(\mu_n \cdot R_1)}{Y_1(\mu_n \cdot R_1)} \cdot Y_0(\mu_n)} \dots \dots \dots (6)$$

Корни  $\mu_n$  возрастают с ростом индекса, поэтому, начиная с некоторого момента времени, в решении /3/ можно ограничиться первым членом суммы. Тогда зависимость температуры стенки от времени выразится простой экспонентой:

$$\theta = A_0 \cdot H(\mu_0 \cdot R) \cdot e^{-\mu_0^2 \frac{a\tau}{R^2}}$$

что означает

наступление стадии регулярного режима охлаждения. Коэффициент в показателе этой экспоненты называют темпом охлаждения и обозначают  $m_0$ . При наступлении регулярного режима темп охлаждения остается величиной одинаковой и постоянной для любой точки охлаждаемого тела и определяется условиями теплоотдачи. Связь между коэффициентом теплоотдачи и темпом охлаждения тела дает характеристическое уравнение /6/.

Найдем решение для более общего случая, когда температура жидкости изменяется во времени и по длине трубы. Решение для  $\Theta$  будем искать в виде разложения в ряд по собственным функциям

$$H(\mu_n R) :$$

$$\Theta = \sum_{n=0}^{\infty} \mathcal{J}_n(x) \cdot H(\mu_n R) \dots \dots \dots / 7/$$

При  $X = 0$

$$\text{Представим } \frac{\partial U}{\partial X} \text{ как } \sum_{n=0}^{\infty} A_n H(\mu_n R) = 1. \quad \frac{\partial U}{\partial X} \cdot 1 = \frac{\partial U}{\partial X} \sum_{n=0}^{\infty} A_n H(\mu_n R) \dots \dots \dots / 8/$$

Подставив /7/ и /8/ в уравнение /1/, получим уравнение для  $\mathcal{J}_n(x)$ :

$$\frac{\partial \mathcal{J}_n(x)}{\partial X} + \mu_n^2 \mathcal{J}_n(x) = -A_n \cdot \frac{\partial U}{\partial X} \dots \dots \dots / 9/$$

Используя начальное условие и разложение /7/, где

$H(\mu_n R)$  есть известные функции координат. получим, что  $\Theta|_{x=0} = 0$ , когда  $\mathcal{J}_n(0) = 0$ .

Таким образом, имеем линейное дифференциальное уравнение /9/ с граничным условием  $\mathcal{J}_n(0) = 0$ . Решением этого уравнения будет:

$$\mathcal{J}_n(x) = -A_n \int_0^x \frac{\partial U}{\partial X} \cdot e^{-\mu_n^2(x-x')} dx' \dots \dots \dots / 10/$$

Тогда

$$\Theta = - \sum_{n=0}^{\infty} A_n H(\mu_n R) \int_0^x \frac{\partial U}{\partial X} \cdot e^{-\mu_n^2(x-x')} dx' \dots \dots \dots / 11/$$

Корни характеристического уравнения  $\mu_n$  быстро возрастают с ростом "  $n$  ". Подынтегральная функция  $\frac{\partial U}{\partial X} e^{-\mu_n^2(x-x')}$  ограничена и практически отлична от нуля в небольшом интервале, где  $X$  близко к  $X'$ . Поэтому при больших значениях  $X$  в решении /11/ можно ограничиться первым членом суммы:

$$\Theta = -A_0 H(\mu_0 R) \int_0^x \frac{\partial U}{\partial X} e^{-\mu_0^2(x-x')} dx' \dots \dots / 12/$$

Подставив /12/ в дифференциальное уравнение /2/ и обозначив  $A \cdot H(\mu_0) \omega = K$ , получим общее интегро-дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial U}{\partial Y} + x_0 \frac{\partial U}{\partial X} = -K \int_0^x \frac{\partial U}{\partial x} e^{-\mu_0^2(x-x')} dx' \dots /13/$$

с начальным и граничным условиями

$$U|_{x=0} = 1; \quad U|_{Y=0} = 0.$$

Уравнение /13/ решается операторным методом с применением функционального преобразования Лапласа /Л-4, Л-5/:

$$\mathcal{L}[U(x)] = F(\beta) = \int_0^\infty U(x) e^{-\beta x} dx.$$

Проведя преобразование, получим:

$$\frac{\partial F}{\partial Y} + \beta \left( x_0 + \frac{K}{\beta + \mu_0^2} \right) \cdot F = x_0 + \frac{K}{\beta + \mu_0^2} \dots /14/,$$

$$F|_{Y=0} = 0$$

Решением этого линейного дифференциального уравнения будет:

$$F = \frac{1}{\beta} \left[ 1 - e^{-\beta \left( x_0 + \frac{K}{\beta + \mu_0^2} \right) \cdot Y} \right] \dots /15/$$

Применив обратное преобразование Лапласа к решению /15/, получим:

при  $x < x_0 \cdot Y$ :  $U = 1$ ;

при  $x > x_0 \cdot Y$ :

$$U(x, Y) = 1 - e^{-K Y} \left[ 1 + \int_0^{x'} \frac{e^{-\mu_0^2 x''}}{\sqrt{\frac{x''}{K Y \mu_0^2}}} \cdot I_1(2\sqrt{x'' Y K \mu_0^2}) dx'' \right] \dots /16/$$

где:  $x' = x - x_0 \cdot Y$ ,  $I_1$  - модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка.

Величина  $x = x_0 \cdot Y$  соответствует времени, в течение которого частица жидкости, находящаяся в начальный момент во входном сечении трубы, достигает сечения  $Y$ .

Обозначив  $y = \mu_0^2 x'$ ,  $\delta = 2\sqrt{\kappa} = 2\sqrt{A_0 H(\mu_0) \frac{\alpha \cdot S}{G \cdot C}}$ ,  
получим при  $y > 0$

$$U = \frac{u - u_0}{t_0 - u_0} = 1 - e^{-\frac{\delta^2 \tau}{4}} \left[ 1 + \frac{\delta \sqrt{y}}{2} \int_0^y \frac{e^{-y'}}{\sqrt{y'}} I_1(\delta \sqrt{y'} \sqrt{\tau}) dy' \right] \dots /17/.$$

При  $y \rightarrow \infty$   $\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial y} = -1$ , то-есть температу-  
ра жидкости убывает во времени по закону:

$$U = U_0 \cdot e^{-y} = U_0 \cdot e^{-\mu_0^2 \cdot \frac{\alpha \tau}{\delta^2}} = U_0 \cdot e^{-m_0 \tau} \dots \dots \dots /18/.$$

Таким образом, при очень больших временах режим охлажде-  
ния приближается к регулярному.

Рассмотрим логарифмическую производную по времени от  
температуры жидкости на выходе из трубы:

$$\frac{d}{d\tau} \ln U = \frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{d\tau} = -m$$

Эта производная представляет собой темп охлаждения  $m$ ,  
который можно определить графически как тангенс угла наклона  
касательной к кривой  $\ln U = f(\tau)$ .

На рис. I графически представлена функция

$$-\frac{m}{m_0} = \frac{d}{dy} \ln U = \frac{1}{m_0} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{dU}{d\tau} = f(m_0 \tau).$$

Параметр "  $\delta$  " включает в себя величину  $\frac{\alpha \cdot S}{G \cdot C}$ ,  
равную отношению подогрева жидкости в трубе к разности темпера-  
тур между стенкой и жидкостью. Из рис. I видно, что темп  $m$   
возрастает со временем и убывает с увеличением относительного  
подогрева жидкости. Если подогрев жидкости не очень большой, и,  
если рассматривать процесс охлаждения в моменты времени, значител-  
но удаленные от начального момента охлаждения, то величина  $m$   
остается практически постоянной в течение времени, достаточного  
для проведения необходимых измерений.



Полученное решение /17/ дает возможность определить коэффициент теплоотдачи по экспериментально найденному изменению температуры жидкости во времени. Влияние нестационарности процесса на коэффициент теплоотдачи будет несущественным, когда за время прохождения жидкостью участка трубы, равного по длине участку тепловой стабилизации, условия на поверхности теплообмена /тепловой поток и температура стенки/ практически останутся постоянными. Согласно теоретического решения /Л-3/ длина участка тепловой стабилизации

$$l^* \leq 0,07 \frac{\bar{w} (2r_0)^2}{a_f},$$

$a_f$  - температуропроводность жидкости.

Время прохождения жидкостью участка  $\tau^*$

$$\tau^* \leq 0,07 \frac{(2r_0)^2}{a_f}$$

В описанных ниже опытах за время  $\tau^*$  изменения условий на поверхности теплообмена составляют сотые доли процента.

#### Опытная проверка метода

Для опытной проверки нестационарного метода был исследован коэффициент теплоотдачи от медной трубы к двум теплоносителям:

1. К воде, как широко изученному теплоносителю с достаточно хорошо известными свойствами.

2. К эвтектическому сплаву натрия-калия /22% Na, 78% K/, который имеет малую теплоемкость и высокий коэффициент теплоотдачи.

Эти два теплоносителя позволяют испытать методику в очень большом интервале величины относительного подогрева. Так в опытах величина отношения подогрева жидкости к температурному напору стенка-жидкость изменялась от 0,1 до 3,82. Время записи температуры изменялось от 30 до 100 сек; полное время протекания жидкости в трубе за один опыт составляло 35-400 сек. Проведенный анализ ошибки показал, что максимальная ошибка однократного измерения коэффициента теплоотдачи в проведенных опытах составляет от 9% для воды до 25% для жидкого металла, что подтверждено величиной разброса опытных точек.

Некоторым усовершенствованием измерительной аппаратуры и обработки опытных данных можно уменьшить максимальную ошибку до 5%.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.3. Охлаждающая жидкость с постоянным напором протекает из верхнего бака в нижний и при этом охлаждает предварительно нагретую опытную трубу. Все детали установки, кроме опытного участка, изготовлены из нержавеющей стали IX18H9T.

В верхнем баке для измерения расхода жидкости имеются два контактных уровнемера, подключенных к электросекундомеру. В дне бака установлен клапан, управляемый дистанционно. В баке имеется устройство для поддержания постоянного напора жидкости. В нижней части бака установлены термодары, измеряющие температуру жидкости на входе в опытный участок.

Опытный участок /рис. 4/ выполнен в виде толстостенной трубы из меди МТ /99,9%/. Участок подсоединяется к баку и трубопроводу соединением "шар-конус". На участке имеются кольцевые проточки для уменьшения осевых перетечек тепла. Теплоизоляция участка выполнена из стальной фольги. Такая изоляция имеет малую теплоемкость и теплопроводность. В стенке участка в канавке глубиной 6 мм и шириной 0,6 мм заделаны нихром-константановые термодары диаметром 0,2 мм в алуидовой изоляции. Канавки замазаны пастой, приготовленной из окиси бериллия на жидком стекле. Термодары, измеряющие температуру жидкости на выходе из участка, находятся в чехле из нержавеющей стали диаметром 0,8/0,5 мм. Чехол вводится в участок на сальнике с набивкой из медных П-образных колец.

В нижнем баке предусмотрено смотровое окно с подсветкой для наблюдения за состоянием поверхности жидкости. Сифонный вентиль, обеспечивающий регулировку расхода жидкости расположен у входа в нижний бак.

Запись изменения во времени температуры жидкости на выходе из рабочего участка и температуры стенки осуществлялась переносным I4-ти шлейфовым осциллографом ПОВ-I4 /шлейф типа ГБ-3 имеет чувствительность  $7,5 \cdot 10^{-9}$  ампер/мм · м, внутреннее сопротивление 24 ом. и собственную частоту 1,3 герц/. Для записи только температуры жидкости использовался гальванометр ППЗ-2 с чувствительностью 20 мм на  $1^{\circ}\text{C}$ . Гальванометр имеет собственный период колебания  $T_0 = 2,4$  сек. Однако решение уравнения движения рамки данного гальванометра при условии, что подаваемое на рамку напряжение меняется во времени как  $e^{-m\tau}$ , показало, что даже при  $m = 1000$  1/час прибор дает отклонение от истинного значения измеряемой величины за счет запаздывания: в первую секунду - 3,5%, во вторую - 0,4% и, начиная с третьей секунды, практически запаздывание не ощутимо. Измерение температур жидкости и температуры рабочего участка проводилось с помощью полуавтоматического потенциометра Р-2. Расход жидкости измерялся объемным методом. Частота электрической сети проверялась частотомером Д-506 ил. 0,2 и путем сравнения показаний электросекундомера и пружинного секундомера.

220

Обработка опытов производится с использованием номограммы рис. 1 и графика рис. 2. По найденной экспериментально в произвольном масштабе зависимости подогрева жидкости от времени

$$\Delta u = u_{\text{вых.}} - u_0 = f(\tau)$$

графическим дифференцированием определяется темп охлаждения

$$m_1 \text{ при } \tau = \tau_1 :$$

$$m_1 = \left. \frac{d}{d\tau} \ln \Delta u \right|_{\tau = \tau_1}$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  находится подбором. Подбор проводится таким образом, чтобы на номограмме рис. 1 точка, соответствующая  $m_0 \tau_1$  и  $\frac{m_1}{m_0}$ , легла на кривую с параметром "  $\beta_1$  ".

Параметр "  $\beta_1$  " подсчитывается по экспериментально найденной средней скорости  $\bar{W}$  и подбираемому значению  $\alpha$ . Значения  $m_0$  и  $A_0 \cdot H(\mu_0)$  находятся по графику рис. 2 в зависимости от выбранного значения  $\alpha$

Полученные при экспериментальной проверке метода данные по теплоотдаче к воде хорошо согласуются с формулой М.А.Михеева /Л-2/ /рис. 5/

$$Nu = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$
 описывающей средний коэффициент теплоотдачи в каналах с отношением длины к диаметру больше 50.

Опыты со сплавом натрий-калий проводились при температуре 20-60° Медная труба и сплав предварительно не очищались. Суммарное время, в течение которого сплав протекал в трубе, не превышает одного часа. Опытные данные по теплоотдаче к сплаву согласуются с данными М.А.Михеева, В.А.Баума, К.Д.Воскресенского, О.С.Федынского, а также с данными С.С.Кутателадзе и В.М.Боришанского, полученными в опытах, где не принимались специальные меры по очистке расплавленных металлов и теплоотдающих поверхностей /Л-6, Л-7/ /см. рис. 6/.

Проведенные эксперименты доказывают возможность применения нестационарного метода измерения коэффициента теплоотдачи в условиях, когда температура жидкости изменяется по длине канала.

Предлагаемый метод измерения коэффициента теплоотдачи обладает рядом преимуществ по сравнению со стационарными методами.

1. Метод скоростной, так как не требуется времени на установление стационарного режима. Опыт продолжается несколько минут. В опытах измеряется только расход жидкости и записывается изменение во времени температуры жидкости.

2. Проста обработка опытных данных.

3. В опытах производится измерение температуры в произвольном масштабе. Поэтому не требуется тщательная градуировка термпар и приборов.

4. В опытах не требуется измерять температуру стенки и величину теплового потока, что упрощает конструкцию опытного участка.

5. Конструкция экспериментальной установки для измерения коэффициента теплоотдачи нестационарным методом весьма проста, так как в схеме установки отсутствуют циркуляционный насос и постоянно действующий холодильник.

6. Вследствие того что время опыта мало, в качестве конструкционных материалов для опытного участка можно использовать материалы, коррозионная стойкость которых в исследуемой среде ограничена.

7. При наличии постоянного во времени тепловыделения в стенке опытного участка, закон изменения во времени температуры жидкости остается тем же, что и без тепловыделения. Поэтому метод может быть применен для определения теплоотдачи в ядерных реакторах по изменению во времени температуры теплоносителя.

В случае, когда неудобно измерять среднюю температуру жидкости в данном сечении трубы, можно измерять температуру стенки в любой точке этого сечения, так как температура стенки и жидкости изменяются во времени по одному закону. Это было проверено аналитически, а также специальными опытами, в которых производилась одновременная запись на осциллограф температур стенки и жидкости в одном сечении.

Мы рассмотрели задачу об охлаждении круглой трубы.

Решение задачи об охлаждении стержня жидкостью, протекающей в симметричном кольцевом зазоре при теплоподводе со стороны стержня, приводит к тем же результатам. Для сложных каналов, когда отсутствует осевая симметрия, задачу об охлаждении цилиндрического тела можно приближенно привести к задаче об охлаждении трубы или стержня /Л-4/.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Г.М., Регулярный тепловой режим. Москва, 1954г
2. Михеев М.А. , Основы теплопередачи .Москва, 1956г
3. Лабунцов Д.А., Некоторые вопросы теории теплообмена при ламинарном течении жидкости в трубах. Теплоэнергетика (№3) (1958г)
4. Лыков А.В., Теория теплопроводности. Москва 1952г
5. Лаврентьев М.А. и Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного, Москва-Ленинград , 1951г
6. Михеев М.А., Баум В.А., Воскресенский К.Д., Федынский О.С., Теплоотдача расплавленных металлов. Доклад на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955г
7. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течении жидких металлов в круглых трубах. Журнал технической физики, том XXVIII, вып 4, (1958г).



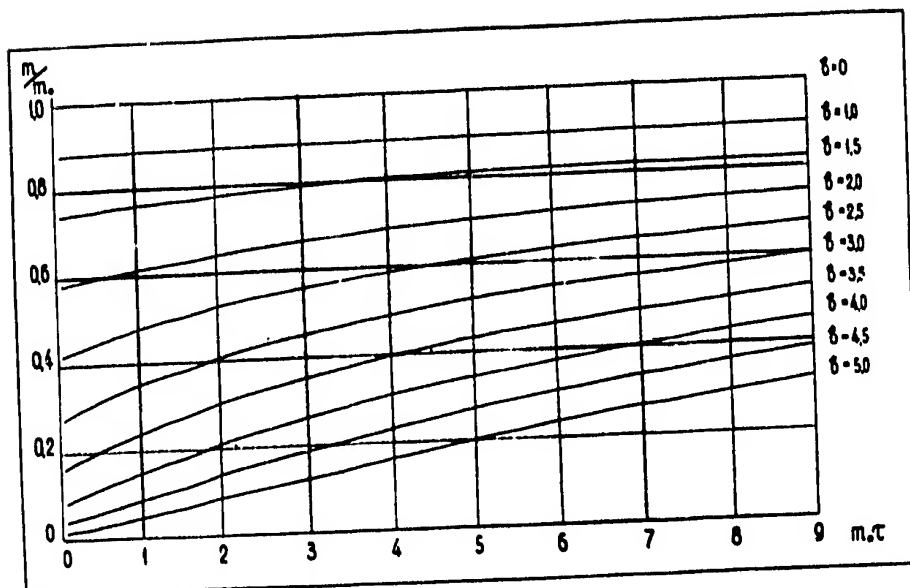


Рис. I. Отношение темпа  $m$  к темпу регулярного режима  $m_0$  в зависимости от  $m_0 T$ .

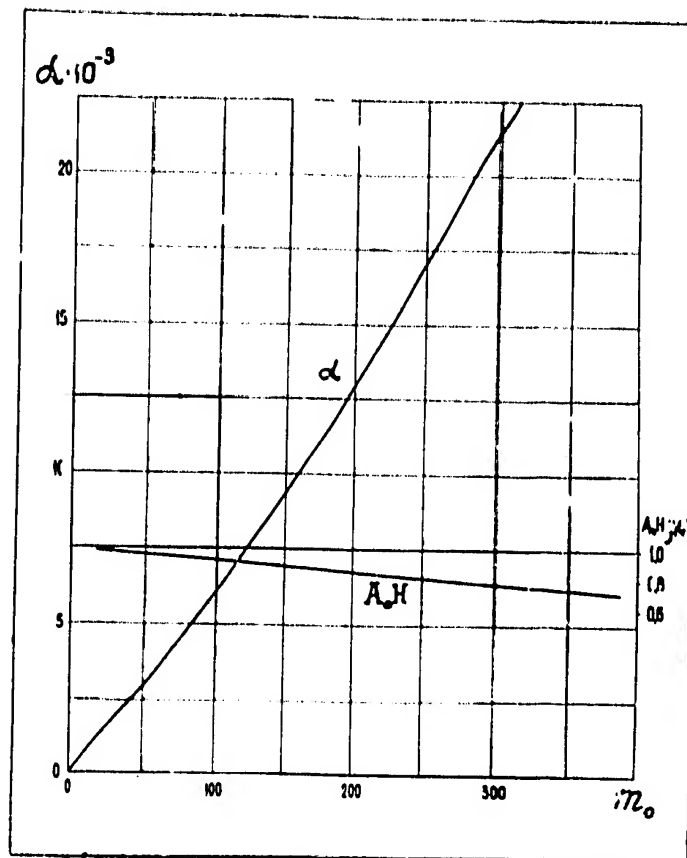


Рис.2. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и величины  $A_0H (\mu)$  от темпа  $m_0$  (для медной трубы, использованной в настоящей работе)

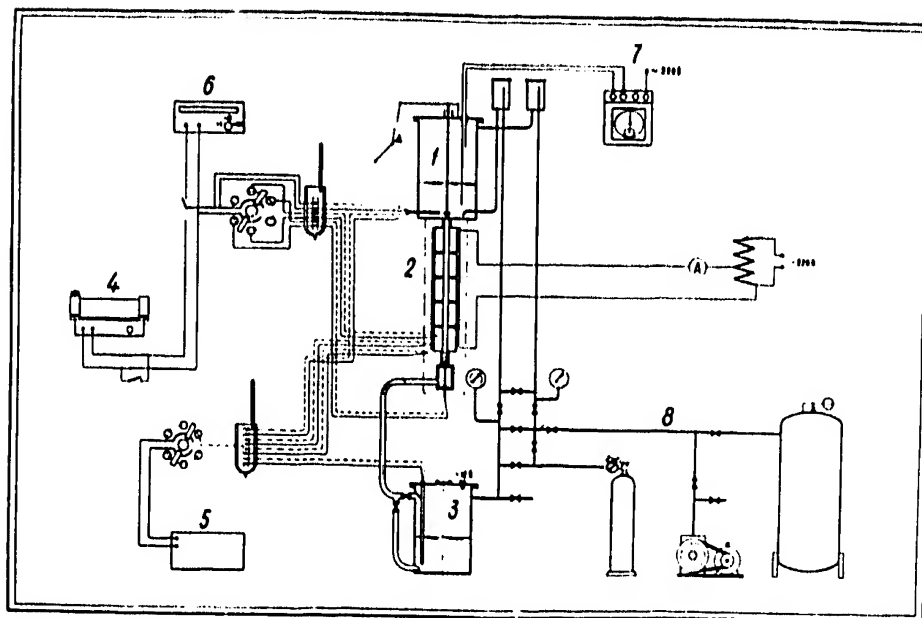


Рис.3. Схема установки:  
 1 - верхний бак; 2- опытный участок;  
 3 - нижний бак; 4- осциллограф;  
 5 - потенциометр; 6 - гальванометр;  
 7 - электросекундомер; 8 - газовая  
 система

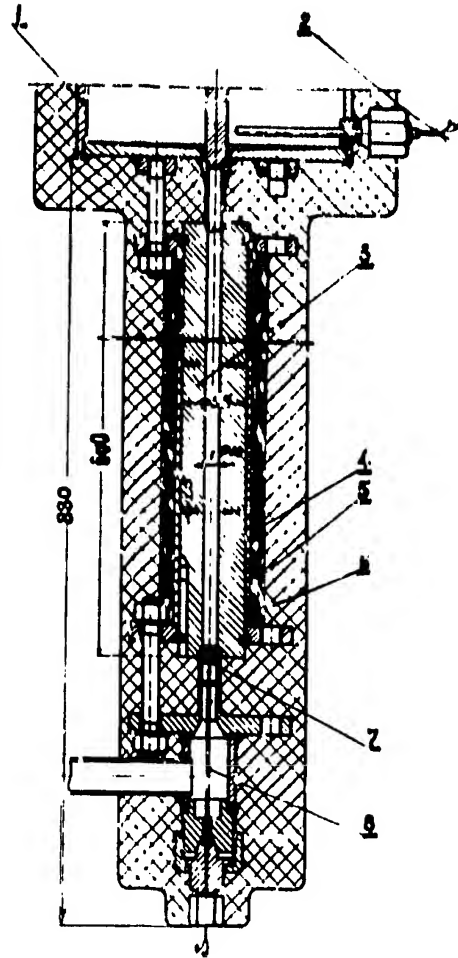


Рис.4. Экспериментальный участок:  
 1 - верхний бак; 2 - термopapa; 3 - опы-  
 тный участок; 4 - теплоизоляция из фоль-  
 ги; 5 - асбестовая теплоизоляция; 6 - на-  
 грeватель; 7 - смеситель; 8 - термopapa,  
 измеряющая температуру жидкости на вы-  
 ходе из опытного участка

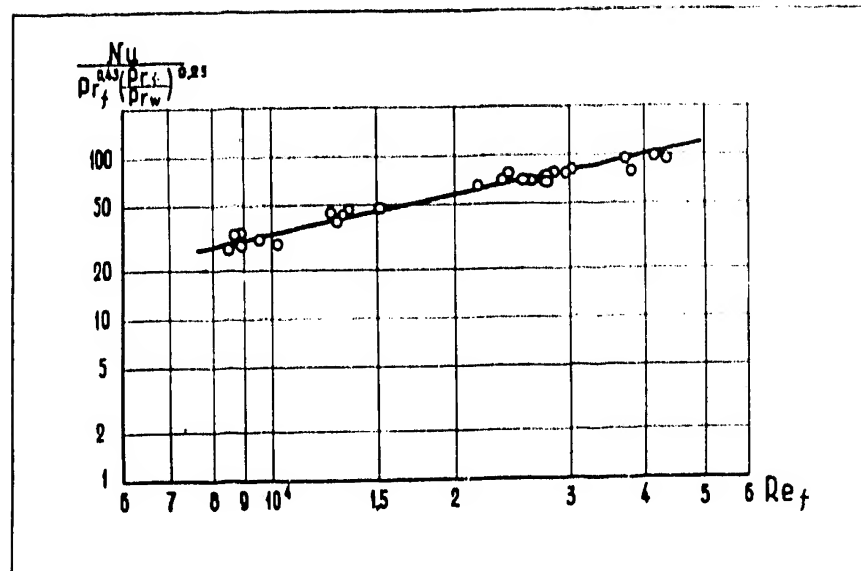


Рис.5. Сравнение опытных данных, полученных на воде, с формулой М.А.Михеева (Л-2)

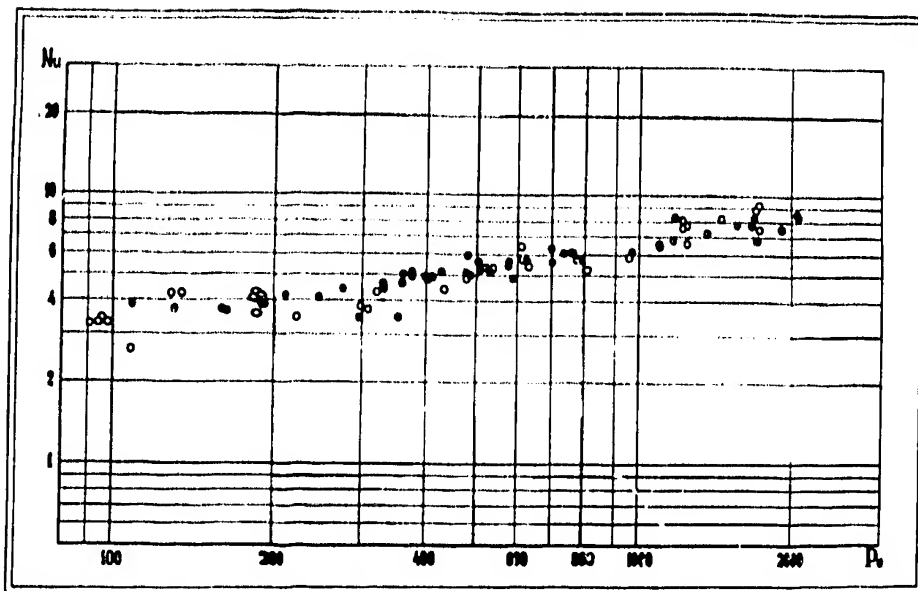


Рис.6. Сравнение опытных данных, полученных на сплаве Na-K (•), с результатами, полученными на Na другими авторами (Л-6 ○, Л-7 ○) в условиях, когда не принимались специальные меры по очистке жидкого металла и поверхностей теплообмена